

Міністерство освіти і науки України

**Тернопільський національний технічний університет
Імені Івана Пулюя**

**Кафедра систем електроспоживання
та комп'ютерних технологій в
електроенергетиці**



ЛІТЕРАТУРА

НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт

з дисципліни «Основи електроприводу»

**для студентів денної і заочної форм навчання
напряму 6.050701 “Електротехніка та електротехнології”**

Тернопіль, 2017

Міністерство освіти і науки України

**Тернопільський національний технічний університет
Імені Івана Пулюя**

Кафедра систем
електроспоживання та
комп'ютерних технологій в
електроенергетиці

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт

з дисципліни «Основи електроприводу»

для студентів денної і заочної форм навчання
напряму 6.050701 “Електротехніка та електротехнології”

Тернопіль, 2017

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Основи електроприводу» для студентів денної і заочної форм навчання напрямку 6.050701 “Електротехніка та електротехнології”.

Укладач: Решетник В.Я., Кислиця Т.А.— Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2017. – 39 с.

Кафедра систем електроспоживання та комп’ютерних технологій в електроенергетиці

Укладач: к.т.н., доцент
асистент

Решетник В.Я.
Кислиця Т.А.

Рецензент: к.т.н., доцент

Буняк О.А.

Затверджено науково-методичною радою факультету прикладних інформаційних технологій та електроінженерії,
протокол №8 від 3 березня 2017 р.

Затверджено на засіданні кафедри систем електроспоживання та комп’ютерних технологій в електроенергетиці,
протокол № 6 від 14 лютого 2017 р.

ЗМІСТ

Лабораторна робота №1. Дослідження на математичній моделі механічних характеристик електродвигуна постійного струму з двозонним регулюванням	6
Лабораторна робота №2. Дослідження на математичній моделі пускових характеристик і енергоефективності електродвигуна постійного струму з двозонним регулюванням	14
Лабораторна робота №3. Дослідження на математичній моделі механічних характеристик і ККД трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором при регулюванні напругою	21
Лабораторна робота №4. Дослідження на математичній моделі механічних характеристик трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором при частотному регулюванні	31
Перелік посилань	39

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

Дослідження на математичній моделі механічних характеристик електродвигуна постійного струму з двозонним регулюванням

Мета лабораторної роботи – засвоїти математичний опис електродвигуна, його характеристики в усталеному режимі роботи і способи регулювання частоти обертання.

Завдання лабораторної роботи

- вивчення принципу дії, будови і конструкції, схеми заміщення, математичного опису та способів регулювання двигуна постійного струму;
- дослідження регулювальних характеристик при регулюванні напруги якоря;
- дослідження регулювальних характеристик при регулюванні потоку збудження;
- обробка результатів дослідів та складання звіту.

Основні теоретичні відомості

Математичний опис електродвигуна постійного струму з незалежним збудженням детально розглядається у підручнику [1] та посібнику "Основи автоматизованого електропривода"-[2]. Рівняння механічної й електромеханічної характеристик, які характеризують двигун як об'єкт регулювання в усталеному режимі можна отримати з наступних рівнянь:

$$U_{\text{я}} = I_{\text{я}} R_{\text{я}} + E, \quad (1.1)$$

$$M = M_0, \quad (1.2)$$

де $E = c \Omega$ – ЕРС електродвигуна;

$M = c I_{\text{я}}$ – обертовий момент двигуна;

M_0 – момент опору навантаження;

Ω - частота обертання, рад/с;

$c = K\Phi$ – коефіцієнт зворотного зв'язку за ЕРС двигуна.

Після підстановки $E = K\Phi\Omega$ у рівняння (1.1) отримаємо

$$\Omega = \frac{U_{\text{я}}}{K\Phi} - \frac{I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{K\Phi}, \quad (1.3)$$

Враховавши $M = c I_{\text{я}}$, отримаємо

$$\Omega = \frac{U_{\text{я}}}{c} - \frac{R_{\text{я}} M}{c^2}. \quad (1.4)$$

Вираз (1.3) носить назву рівняння *електромеханічної характеристики*, а (1.4) – *механічної характеристики*. З рівняння (1.3) видно, що частота

обертання Ω двигуна постійного струму (ДПС) залежить від моменту навантаження ($M=M_0$), а регулювати її можна зміною напруги на якорі $U_{я}$, зміною потоку збудження Φ і зміною опору в колі якоря $R_{я}$, вмикаючи у коло якоря реостат. Механічні характеристики кожного способу регулювання зображені на рисунку 1.1.

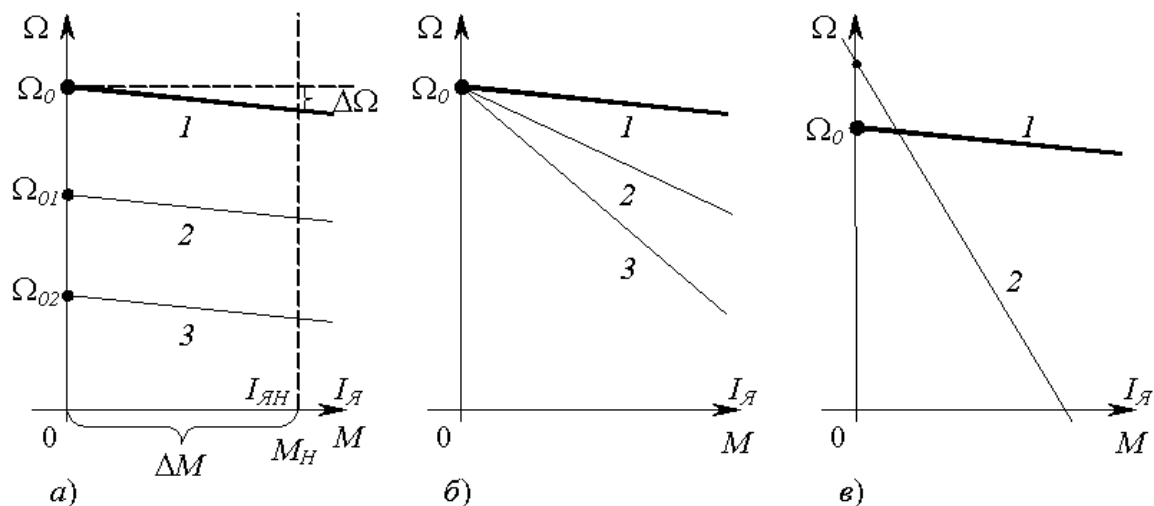


Рисунок 1.1 – Характеристики ДПС за різних способів керування: а) при регулюванні напругою на обмотці якоря; б) при регулюванні реостатом, ввімкненим послідовно з обмоткою якоря; в) при регулюванні потоку збудження

Характеристику 1, отриману при номінальній напрузі $U_{я}=U_n$ і номінальному потоці Φ_n збудження називають *природною*. Характеристики 2 і 3 на рис. 1.1 а) отримують зміною напруги живлення якоря. Ці характеристики називають *штучними* або *регульовальними за напругою*. Для роботи за цими характеристиками живлення двигуна необхідно здійснювати від регульованого випрямляча – тиристорного перетворювача напруги. Цей спосіб регулювання є найкращим для реалізації у системах автоматичного регулювання, тому його застосовують у серійних комплектних електроприводах.

Характеристики 2 і 3 на рис.1.1.б) отримують регулюванням опору в колі якоря. Цей спосіб не застосовують для автоматичного регулювання частоти, його використовують для обмеження пускового струму двигуна. При опорі реостата рівному нулю струм $I_{я}$ визначається механічним навантаженням на валу двигуна. Відповідно до (1.1) в момент пуску двигуна $E=0$ і до обмотки прикладена повна напруга $U_{я}$. Тому пусковий струм у 5-7 разів перевищує номінальний. Це призводить до спаду напруги мережі. Для обмеження струму послідовно з обмоткою якоря вмикають реостат. Реостат вмикають на час пуску і розгону, а коли двигун досягне заданої швидкості, реостат автоматично вимикається. При

опорі реостата рівному нулю отримаємо природну характеристику I. Якщо опір реостата не дорівнює нулю, отримаємо штучні *реостатні* характеристики.

Характеристику 2 на рис.1.1.в) отримують регулюванням потоку збудження Φ тоді, коли необхідно регулювати частоту обертання у зоні II. Електродвигун постійного струму з незалежним збудженням має дві зони регулювання, зображені на рис. 1.2 . У зоні I двигун регулюється з номінальним моментом навантаження при номінальному струмі якоря.

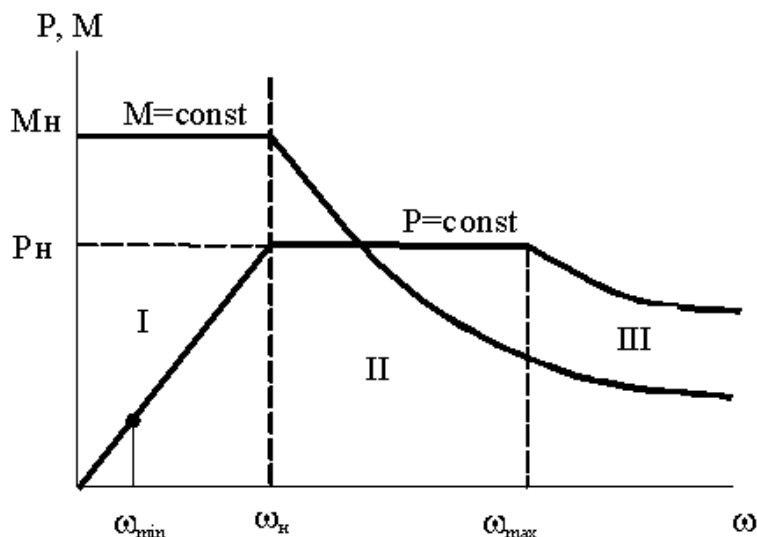


Рисунок 1.2 – Залежність потужності і моменту ДПС від частоти обертання

При цьому частоту регулюють від Ω_{\min} до Ω_n зміною напруги на якорі. У цій зоні регулювання момент має постійне номінальне значення $M = M_n$, а потужність на валу двигуна змінюється за рахунок зміни частоти обертання. В зоні II частоту регулюють від Ω_n до Ω_{\max} зміною потоку збудження від Φ_n до $0,5 \Phi_n$ при $U_{\text{я}} = U_n$. При цьому потужність не змінюється і зберігає постійне значення $P = P_n$ за рахунок того, що швидкість зростає, а момент спадає, а добуток $P = M\Omega = \text{const}$. Зона III є неробочою, але іноді регулювання в цій зоні використовують для допоміжних операцій, для виконання яких достатнім є знижений момент двигуна (наприклад, зворотний хід приводу подачі верстата). Регулювання у двох зонах застосовують у електроприводах металообробних верстатів для розширення діапазону регулювання. Такі електроприводи називають **двозонними**. В епоху широкого засвоєння електроприводів з числовим програмним керуванням (ЧПК) в СРСР виготовляли двозонні електроприводи верстатної серії ЕПУ1- 2Д [5].

Для прикладу обираємо електродвигун типу **2ПН90ЛУХЛ4** технічні дані якого наведені у додатку А [3].

P_n , кВт	U_n , В	n_n , об/хв	η_n , %	$R_\gamma = r_\gamma + r_\partial$, Ом	$R_{зб}$, Ом	J , кгм^2
1,3	220	3150	78	2,23	340	0,005

У позначенні типу двигуна: **2П** – друга серія машин постійного струму; **Н** – конструктивне виконання захищене з самовентиляцією; **90** – висота осі обертання; **Л** – умовне позначення довжини осердя (**М** – середня; **Л** – велика); **Г** – наявність вбудованого тахогенератора; **УХЛ** – кліматичне виконання для районів з помірним і холодним кліматом; категорія приміщень – для опалюваних приміщень.

Для дослідження способів регулювання двигуна і отримання регулювальних характеристик у додатку EXCEL потрібно зробити необхідні розрахунки, а саме обчислити струми двигуна у номінальному режимі $I_n, I_{ян}, I_{зб}$.

Дослідження регулювальних характеристик при регулюванні напругою

Враховуючи що вихідні дані двигунів у додатку 1 задані для двигунів з паралельним збудженням, обчислюємо номінальні значення загального струму, струму збудження і струму якоря.

$$I_n = P_{1H} / U_n = P_n / \eta_n U_n = 1300 / 0,78 \cdot 220 = 7,58 \text{ А};$$

$$I_{зб} = U_n / R_{зб} = 220 / 340 = 0,65 \text{ А};$$

$$I_{ян} = I_n - I_{зб} = 7,58 - 0,65 = 6,93 \text{ А}$$

Вихідною математичною моделлю електродвигуна в усталеному режимі є рівняння (1.3). Запишемо його відносно частоти обертання n об/хв.

$$n = 9,55(U_\gamma / c - I_\gamma R_\gamma / c). \quad (1.5)$$

При переході від Ω рад/с до n об/хв враховуємо, що $\Omega = 2\pi n / 60$.

В формулу (1.5) підставимо числові значення $n_n, I_{ян}, R_\gamma$ і обчислимо $c = 0,618 \text{ В} \cdot \text{сек}$. Після цього в (1.5) підставимо всі відомі числові дані і отримаємо рівняння природної електромеханічної характеристики

$$n = (9,55 / 0,618) \cdot (220 - 2,23 I_\gamma), \quad (1.6)$$

$$n = 3400 - 34,45 I_\gamma \text{ об/хв.} \quad (1.7)$$

При побудові природної і регулювальних характеристик струм будемо змінювати від 0 до $\approx 1,2 I_{ян}$ так, щоб для кожної характеристики отримати 5-10 точок. У даному випадку струм буде приймати значення 0;1;2;3;4;5;6;7;8;9;10 А. Напругу змінюємо від 220 В до 20 В через 50 В, тобто регулювальні характеристики будуємо для напруг 170; 120; 70; і 20 В. Ці значення напруги підставимо у рівняння (1.5) і отримаємо рівняння

$$n = 2626 - 34,45 I_\gamma;$$

$$n = 1854 - 34,45 I_\gamma;$$

$$n = 1081 - 34,45I_{я};$$

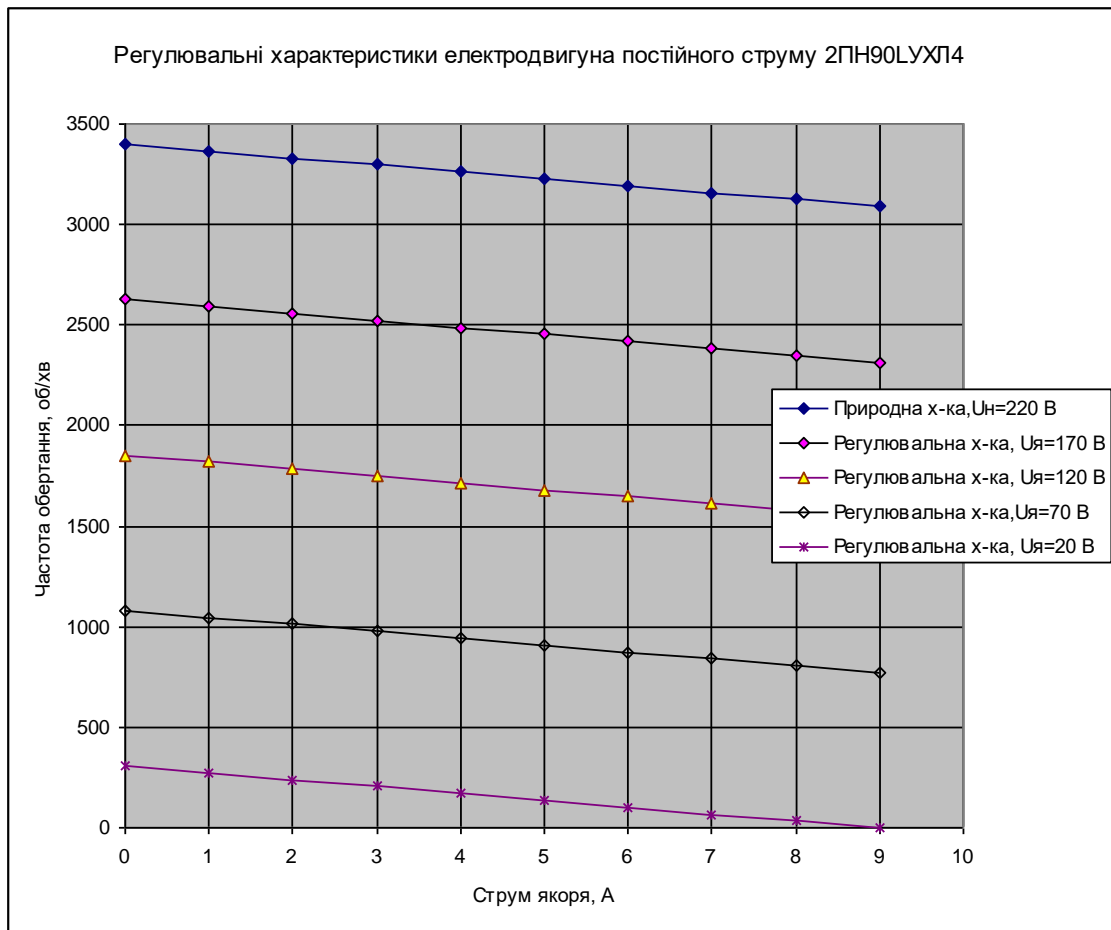
$$n = 309 - 34,45I_{я}. \quad (1.8)$$

Далі створюємо таблиці і графіки у додатку EXCEL – [4]. Відкриваємо Аркуш 1 у документі EXCEL. У комірці B1 і в рядку формул записуємо формулу $=3400-34,45*(A1)$. Виділимо комірку A1, у ній запишемо 0 і натиснемо Enter. Виділимо комірку A2, у ній запишемо число 1 і знову натиснемо Enter. Далі знову виділяємо комірку A1, натискуємо комбінацію клавіш **Shift**↓, виділяємо маркер заповнення і перетягуємо його донизу до комірки A10. Порожні комірки заповняться числами, кожне з яких буде більшим попереднього на різницю між A2 і A1. Виділяємо комірку B1 і перетягуємо маркер заповнення до комірки B11. Формула з комірки B1 буде перенесена у всі комірки діапазону B1-B10, будуть виконані відповідні обчислення і в комірках B1-B10 з'являться результати.

Аналогічно до цього у комірку C1 записуємо формулу $=2626-34,45*(A1)$ і повторюємо всі дії у комірках A1-A10. Потім виділяємо комірку C1 і протягуємо маркер заповнення до комірки C10. У комірках C1-C10 з'являться результати обчислень за першим рівнянням системи (1.10). Аналогічно у комірках D1-D10, E1-E10, F1-F10 отримаємо результати для всіх інших рівнянь. Після того виділяємо комірки діапазону A1-F10, тиснемо на кнопку "Майстер діаграм" і будуємо графіки відповідно до настанови з EXCEL. Потім таблицю і діаграму через буфер обміну вставляємо у звіт, складений як документ WORD.

Таблиця 1.1 – Результати обчислень природної і регулювальних характеристик електродвигуна 2ПН90ЛУХЛ4: 1-й стовпець – значення струму $I_{я}$ в А; 2- й – 6-й стовпці – частота n в об./хв. при напрузі 220; 170; 120; 50 і 20 В відповідно.

0	3400	2626	1854	1081	309
1	3365,55	2591,55	1819,55	1046,55	274,55
2	3331,1	2557,1	1785,1	1012,1	240,1
3	3296,65	2522,65	1750,65	977,65	205,65
4	3262,2	2488,2	1716,2	943,2	171,2
5	3227,75	2453,75	1681,75	908,75	136,75
6	3193,3	2419,3	1647,3	874,3	102,3
7	3158,85	2384,85	1612,85	839,85	67,85
8	3124,4	2350,4	1578,4	805,4	33,4
9	3089,95	2315,95	1543,95	770,95	-1,05



Таким чином, при регулюванні частоти обертання двигуна під навантаженням ($I_a = 7$ А) зміною напруги від 220 до 20 В частота змінюється в діапазоні 3159-68 об/хв., крутний момент двигуна залишається незмінним.

Дослідження регулювальних характеристик при регулюванні потоку збудження

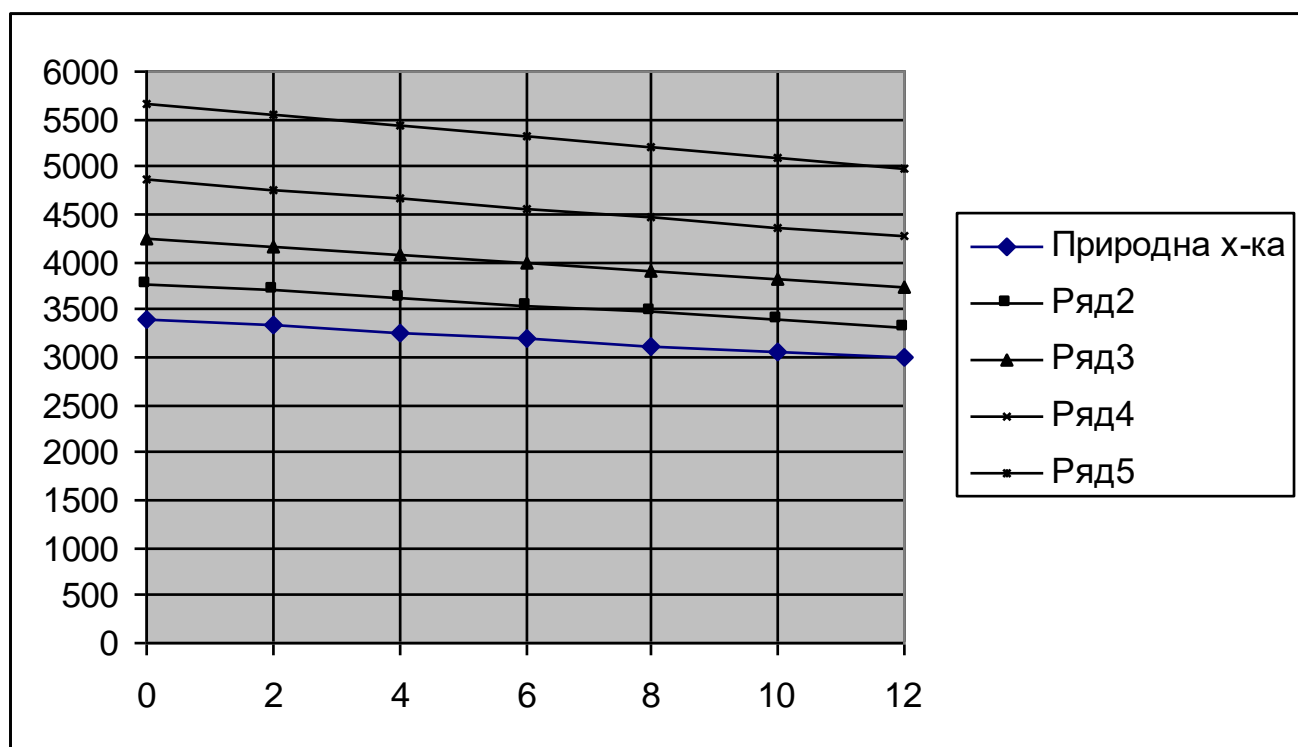
Вихідною моделлю є рівняння природної характеристики (1.6) . У цьому рівнянні $C = K\Phi_n = 0,618B \cdot c$. Змінюючи значення потоку від $1,0\Phi_n$ до $0,5\Phi_n$ ступенями через $0,1\Phi_n$, отримаємо такі рівняння штучних характеристик

$$\begin{aligned}
 &= 3400 - 34,45 \cdot (A1); \\
 &= 3777 - 38,3 \cdot (A1); \\
 &= 4246 - 43 \cdot (A1); \\
 &= 4862 - 49,3 \cdot (A1); \\
 &= 5665 - 57,42 \cdot (A1); \\
 &= 6798 - 68,9 \cdot (A1).
 \end{aligned}
 \tag{1.9}$$

Створюємо аркуш в EXCEL і переносимо таблицю і графіки у звіт.

Таблиця 1.2 – Результати обчислень регулювальних характеристик при регулюванні потоку збудження

0	3400	3777	4246	4862	5665
2	3331,1	3700,4	4160	4763,4	5550,2
4	3262,2	3623,8	4074	4664,8	5435,4
6	3193,3	3547,2	3988	4566,2	5320,6
8	3124,4	3470,6	3902	4467,6	5205,8
10	3055,5	3394	3816	4369	5091
12	2986,6	3317,4	3730	4270,4	4976,2



Отже, при регулюванні потоку збудження в діапазоні від $1,0\Phi_n$ до $0,5\Phi_n$ частота обертання двигуна змінилася у діапазоні від 3400 до 5665 об./хв. Загальний діапазон регулювання у I-й і II-й зонах - від 33,4 до 5665 об./хв.

Додаток А

Таблиця А1 – Технічні дані електродвигунів постійного струму серії 2П

№ за п.	Тип двигуна	Потужність, кВт	Частота обертання об/хв.		ККД %	Опір обмотки при 15 °С			Момент інерції якоря, кг м ²
			номін.	максим.		якоря	дод. полюсів	збудження	
1	2ПН90МУХЛ4	1,0	3000	4000	72,5	2,52	1,47	365	0,004
2	2ПН90ЛУХЛ4	1,3	3150	4000	78	1,3	0,93	340	0,005
3	2ПН100МУХЛ4	1,2	2200	4000	76,5	1,79	0,93	359	0,011
4	2ПН100МГУХЛ4	2,0	3000	4000	79	0,80	0,57	265	0,011
5	2ПН100ЛУХЛ4	1,1	1500	4300	74	2,20	1,57	295	0,012
6	2ПН100ЛГУХЛ4	1,7	2200	4000	78	1,17	0,85	295	0,012
7	2ПН100ЛГУХЛ4	2,2	3150	4000	81	0,52	0,51	295	0,012
8	2ПН112МУХЛ4	1,5	1500	4000	70	1,77	1,55	181	0,015
9	2ПН112МГУХЛ4	2,5	2200	4000	76	0,79	0,68	156	0,015
10	2ПН112МГУХЛ4	3,6	3000	4000	79	0,42	0,36	129	0,015
11	2ПН112ЛУХЛ4	2,2	1500	4000	75	0,97	0,85	168	0,018
12	2ПН112ЛГУХЛ4	3,4	2200	4000	78	0,41	0,41	125	0,018
13	2ПН112ЛГУХЛ4	5,3	3000	4000	80	0,24	0,195	96,3	0,018
14	2ПН132МУХЛ4	1,6	750	2500	68,5	1,88	1,39	134	0,038
15	2ПН132МГУХЛ4	2,5	1000	3000	73,5	1,08	0,76	134	0,038
16	2ПН132МГУХЛ4	4,0	1500	4000	79	0,56	0,34	134	0,038
17	2ПН132МГУХЛ4	7,0	2240	4000	83	0,23	0,17	111	0,038
18	2ПН132МГУХЛ4	10,5	3000	4000	84	0,14	0,09	111	0,038
19	2ПН132ЛУХЛ4	1,9	750	2500	72	1,28	1,0	138	0,048
20	2ПН132ЛГУХЛ4	3,0	1000	4000	75,5	3,38	2,16	138	0,048
21	2ПН132ЛГУХЛ4	5,5	1500	4000	80,5	0,32	0,27	101	0,048
22	2ПН132ЛГУХЛ4	8,5	2240	4000	84	0,17	0,12	89	0,048
23	2ПН132ЛГУХЛ4	14	3150	4000	86	0,08	0,07	76	0,048
24	2ПН160МУХЛ4	3,0	750	3000	75,5	0,14	0,135	128	0,083
25	2ПН160МГУХЛ4	4,5	1000	3000	79,5	0,41	0,30	108	0,083
26	2ПН160МГУХЛ4	7,5	1500	4000	83	0,18	0,135	82	0,083
27	2ПН160МГУХЛ4	13	2240	4000	85,5	0,08	0,06	61,5	0,083
28	2ПН160МГУХЛ4	18	3150	4000	87	0,04	0,02	53,1	0,083

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

Дослідження на математичній моделі пускових характеристик і енергоефективності електродвигуна постійного струму з двозонним регулюванням

Мета лабораторної роботи – засвоїти методику розрахунку пускового реостата для електродвигуна постійного струму, побудови пускових характеристик і оцінки енергоефективності двигуна.

Завдання лабораторної роботи

- дослідження пускових характеристик при регулюванні реостатом;
- дослідження залежності ККД від навантаження;
- оформлення та захист звіту.

Дослідження пускових характеристик

Вихідним є рівняння природної електромеханічної характеристики (дані та рівняння з лабораторної роботи №1)

$$n = 9,55 \left(\frac{U_{\text{я}}}{c} - \frac{I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{c} \right) = \frac{9,55}{c} \cdot (U_{\text{я}} - R_{\text{я}} I_{\text{я}}), \quad (2.1)$$

зокрема

$$\begin{aligned} n &= (9,55 / 0,618) \cdot (220 - 2,23 I_{\text{я}}), \\ n &= 3400 - 34,45 I_{\text{я}} \text{ об/хв.} \end{aligned}$$

Опір реостата розраховуємо за умови щоб при повністю введеному реостаті пусковий струм дорівнював $I_{\text{пуск}} = 2I_{\text{ян}}$.

Отже, рівняння пускової характеристики матиме вигляд

$$\begin{aligned} \frac{9,55}{c} \cdot U_{\text{я}} - \frac{9,55}{c} (R_{\text{я}} + R_{\text{р}}) \cdot 2I_{\text{ян}} &= 0, \\ \frac{9,55}{0,618} \cdot 220 - \frac{9,55}{0,618} (2,23 + R_{\text{р}}) \cdot 2I_{\text{ян}} &= 0, \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$3400 - 15,45(2,23 + R_p) \cdot 2I_{ян} = 0 \quad (2.3)$$

Отже

$$R_p = \frac{(9,55 / c) \cdot U_{я}}{(9,55 / c) \cdot 2I_{ян}} - R_{я}. \quad (2.4)$$

Підставимо числові дані ($U_{ян} = 220 В$, $I_{ян} = 6,93 А$, $R_{ян} = 2,23 Ом$ – дані із лаб. роб. №1) і отримаємо

$$R_p = 3400 / 214,8 - 2,23 = 13,6 Ом.$$

Підставимо отримане значення у вихідне рівняння і отримаємо рівняння пускової характеристики

$$n = (9,55 / c) \cdot (220 - (R_{я} + R_p)I_{я}), \quad (2.5)$$

$$n = (9,55 / 0,618) \cdot (220 - 15,83I_{я}),$$

$$n1 = 3400 - 244,6I_{я}. \quad (2.6)$$

Пусковий реостат складемо з 3-х ступенів. Методика розрахунку опорів реостата викладена у «Методичних вказівках до виконання практичної роботи №3». У даному випадку реостат триступеневий.

Якщо загальний опір реостата 13,6 Ом, то нехай

- опір першого ступеню буде дорівнювати половині, тобто 6,8 Ом;
- опір другого ступеню – 3,4 Ом;
- опір третього ступеню – 3,4 Ом.

Підставимо вказані значення у вихідне рівняння і отримаємо рівняння другої і третьої пускових характеристик

$$n2 = 3400 - 139,5I_{я}, \quad (2.7)$$

$$n3 = 3400 - 87I_{я}, \quad (2.8)$$

Переходимо до EXCEL і отримуємо таблицю 2.1 обчислень й діаграму (рис. 2.1).

Таблиця 2.1 – Результати обчислень реостатних пускових характеристик

$I_{я}, A$	$n1$	$n2$	$n3$	$n4$ ($R_p = 0$)
0	3400	3400	3400	3400
2	2911,04	3121	3226	3331,1
4	2422,08	2842	3052	3262,2
6	1933,12	2563	2878	3193,3
8	1444,16	2284	2704	3124,4
10	955,2	2005	2530	3055,5
12	466,24	1726	2356	2986,6
14	-22,72	1447	2182	2917,7

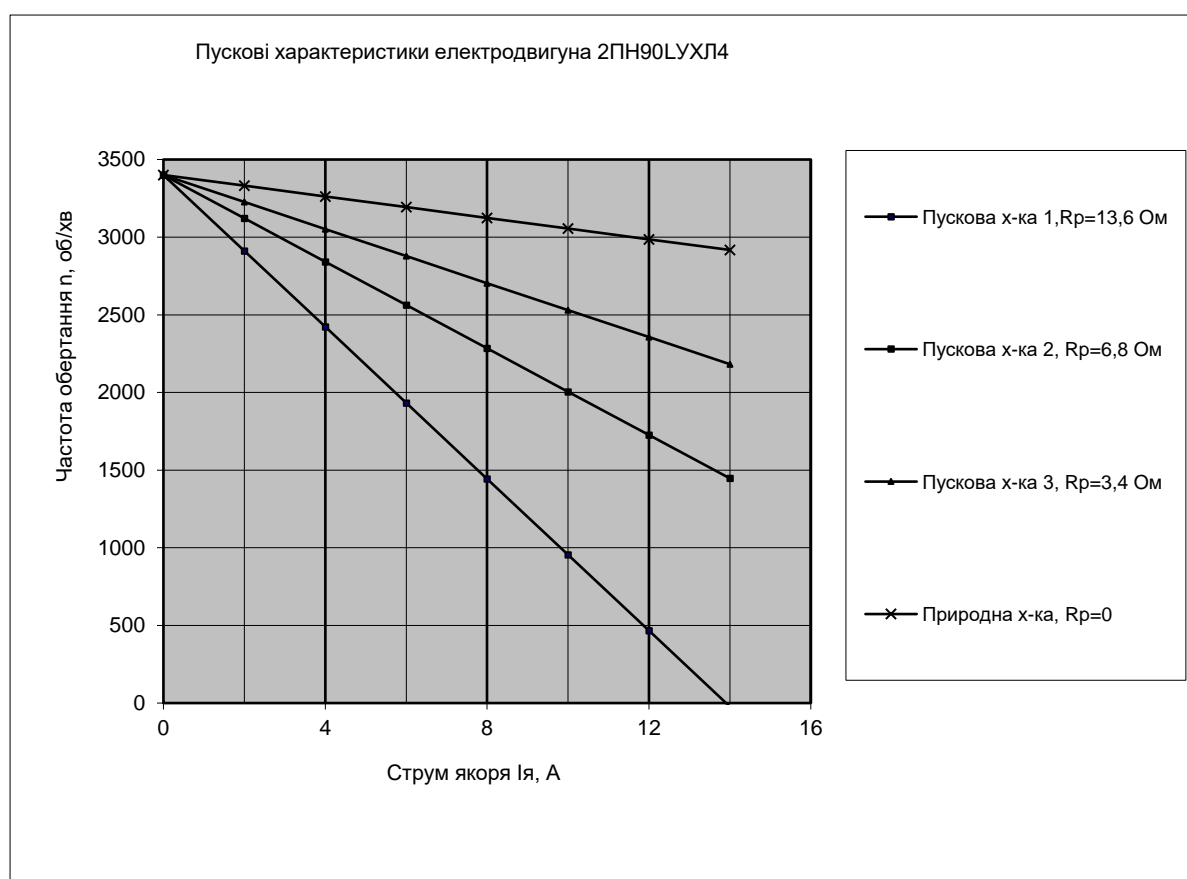


Рисунок 2.1 – Пускові характеристики електродвигуна 2ПН90ЛУХЛ4

Дослідження втрат потужності й енергоефективності двигуна

Енергозбереження двигуна визначається коефіцієнтом корисної дії (ККД) і його залежністю від навантаження. Найвище значення ККД, отже й найменші втрати потужності, двигун має при роботі з номінальним навантаженням. Втрати потужності двигуна умовно можна поділити на постійні і змінні.

Постійні втрати – це ті, які не залежать від навантаження. Це втрати механічні (на подолання опору тертя), втрати магнітні (на намагнічування електромагнітної системи) і втрати на нагрівання обмотки збудження.

Змінні втрати – це ті, що виникають при роботі двигуна під навантаженням і залежать від струму навантаження. Це втрати на нагрівання обмотки якоря. Отже:

$$\Delta P_{ном} = \Delta P_{пост} + \Delta P_{зм}, \quad (2.9)$$

де $\Delta P_{ном}$ - повні втрати у номінальному режимі.

Формула залежності ККД від навантаження наведена в [2] і має вигляд

$$\eta(x) = \frac{\eta_{ном}(1+\alpha)x}{(1-\eta_{ном})x^2 + \eta_{ном}(1+\alpha)x + (1-\eta_{ном})\alpha}, \quad (2.10)$$

де $\alpha = \Delta P_{пост} / \Delta P_{змном}$;

$$x = P / P_{ном} = I_{я} / I_{яном}.$$

Виконуємо необхідні обчислення (необхідні дані взяти з лабораторної роботи №1 або з додатку А)

$$P_{1H} = \frac{P_H}{\eta_H} = \frac{1300}{0,78} = 1666,7 \text{ Вт}, \quad (2.11)$$

$$\Delta P_{ном} = P_{1H} - P_H = \Delta P_{пост} + \Delta P_{змном} = 1666,7 - 1300 = 366,7 \text{ Вт}, \quad (2.12)$$

$$\Delta P_{змном} = \Delta P_{ян} = I_{ян}^2 \cdot R_{я} = 6,93^2 \cdot 2,23 = 107,1 \text{ Вт}, \quad (2.13)$$

$$\Delta P_{пост} = \Delta P_{м} + \Delta P_{зб} = \Delta P_{ном} - \Delta P_{змном} = 366,7 - 107,1 = 259,6 \text{ Вт}. \quad (2.14)$$

Коефіцієнт втрат $\alpha = \Delta P_{пост} / \Delta P_{змном} = 259,6 / 107,1 = 2,42$

Коефіцієнт навантаження x будемо задавати від 0 до 2,0 у точках 0; 0,2; 0,4; 0,6 і т.д. Після підстановки числових значень формула (1.10) буде мати вигляд

$$\eta(x) = \frac{2,67x}{2,67x + 0,22x^2 + 0,53} \quad (2.15)$$

Формула для розрахунку в EXCEL матиме вигляд

$$= 2,67 * (A1) / (2,67 * (A1) + 0,22 * (A1) * (A1) + 0,53)$$

Таблиця 1.2 – Результати обчислень залежності ККД від навантаження

x	η
0	0
0,2	0,497763
0,4	0,653931
0,6	0,724493
0,8	0,761009
1	0,780702
1,2	0,790955
1,4	0,795455
1,6	0,796242
1,8	0,794538
2	0,791111

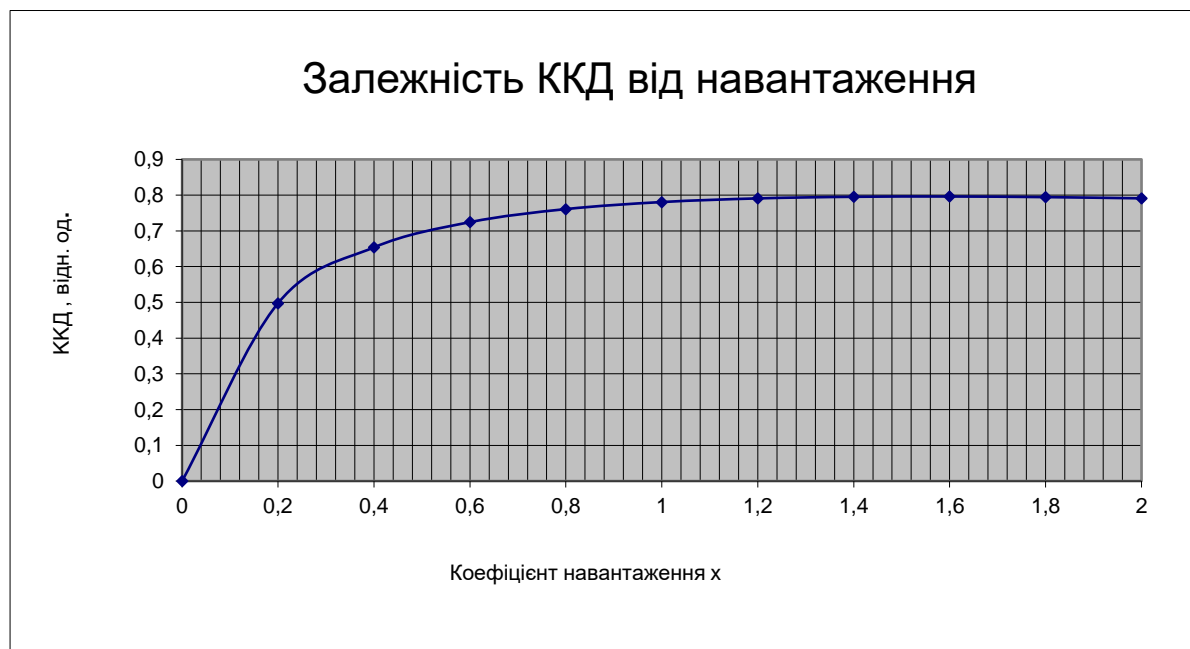


Рисунок 2.2 – Залежність ККД двигуна 2ПН90ЛУХЛ4 від навантаження

Аналіз результатів і висновки. За результатами розрахунку номінальний ККД дорівнює 0,78, що збігається з вихідними даними. Але навіть при подвійному перевантаженні суттєвого зниження ККД непомітно. Пояснити це можна досить значною долею постійних втрат.

Таблиця Б1 – Технічні дані електродвигунів постійного струму серії 2П

№ за п.	Тип двигуна	Потужність, кВт	Частота обертання об/хв.		ККД %	Опір обмотки при 15 °С			Момент інерції якоря, кг м ²
			номін.	максим.		якоря	дод. полюсів	збудження	
1	2ПН90МУХЛ4	1,0	3000	4000	72,5	2,52	1,47	365	0,004
2	2ПН90ЛУХЛ4	1,3	3150	4000	78	1,3	0,93	340	0,005
3	2ПН100МУХЛ4	1,2	2200	4000	76,5	1,79	0,93	359	0,011
4	2ПН100МГУХЛ4	2,0	3000	4000	79	0,80	0,57	265	0,011
5	2ПН100ЛУХЛ4	1,1	1500	4300	74	2,20	1,57	295	0,012
6	2ПН100ЛГУХЛ4	1,7	2200	4000	78	1,17	0,85	295	0,012
7	2ПН100ЛГУХЛ4	2,2	3150	4000	81	0,52	0,51	295	0,012
8	2ПН112МУХЛ4	1,5	1500	4000	70	1,77	1,55	181	0,015
9	2ПН112МГУХЛ4	2,5	2200	4000	76	0,79	0,68	156	0,015
10	2ПН112МГУХЛ4	3,6	3000	4000	79	0,42	0,36	129	0,015
11	2ПН112ЛУХЛ4	2,2	1500	4000	75	0,97	0,85	168	0,018
12	2ПН112ЛГУХЛ4	3,4	2200	4000	78	0,41	0,41	125	0,018
13	2ПН112ЛГУХЛ4	5,3	3000	4000	80	0,24	0,195	96,3	0,018
14	2ПН132МУХЛ4	1,6	750	2500	68,5	1,88	1,39	134	0,038
15	2ПН132МГУХЛ4	2,5	1000	3000	73,5	1,08	0,76	134	0,038
16	2ПН132МГУХЛ4	4,0	1500	4000	79	0,56	0,34	134	0,038
17	2ПН132МГУХЛ4	7,0	2240	4000	83	0,23	0,17	111	0,038
18	2ПН132МГУХЛ4	10,5	3000	4000	84	0,14	0,09	111	0,038
19	2ПН132ЛУХЛ4	1,9	750	2500	72	1,28	1,0	138	0,048
20	2ПН132ЛГУХЛ4	3,0	1000	4000	75,5	3,38	2,16	138	0,048
21	2ПН132ЛГУХЛ4	5,5	1500	4000	80,5	0,32	0,27	101	0,048
22	2ПН132ЛГУХЛ4	8,5	2240	4000	84	0,17	0,12	89	0,048
23	2ПН132ЛГУХЛ4	14	3150	4000	86	0,08	0,07	76	0,048
24	2ПН160МУХЛ4	3,0	750	3000	75,5	0,14	0,135	128	0,083
25	2ПН160МГУХЛ4	4,5	1000	3000	79,5	0,41	0,30	108	0,083
26	2ПН160МГУХЛ4	7,5	1500	4000	83	0,18	0,135	82	0,083
27	2ПН160МГУХЛ4	13	2240	4000	85,5	0,08	0,06	61,5	0,083
28	2ПН160МГУХЛ4	18	3150	4000	87	0,04	0,02	53,1	0,083

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

Дослідження на математичній моделі механічних характеристик і ККД трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором при регулюванні напругою

Мета лабораторної роботи – засвоєння схеми заміщення, математичного опису, характеристик та енергоефективності трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором (АД-КЗ).

Завдання лабораторної роботи

- вивчення принципу дії, будови і конструкції АД, схеми заміщення та математичного опису АД;
- дослідження механічних характеристик АД при зміні напруги;
- дослідження енергоефективності АД;
- обробка результатів дослідів та складання звіту.

Основні теоретичні відомості

У сучасній енергетиці асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором використовують як у регульованому, так і у нерегульованому електроприводі, але переважно у нерегульованому. АД-КЗ технологічні у виготовленні, прості та надійні в експлуатації, бо не мають колекторно-щіткового вузла. Вони мають меншу у 1,5...2 рази, ніж двигуни постійного, струму питому матеріалоемність. Завдяки цим перевагам асинхронний електропривод є основним видом електропривода. Недоліком АД є те, що він складний для керування. Але з розвитком напівпровідникової перетворювальної техніки цей недолік став не суттєвим і нині АД є найперспективнішим електродвигуном як для нерегульованого, так і для регульованого енергозберігаючого електроприводу.

Асинхронні двигуни потужністю від 0,18 *кВт* і більше виготовляють як трифазні. Будова і принцип дії трифазного АД розглянуто у посібниках [1; 2],

математичну модель АД як об'єкта керування отримаємо зі схеми заміщення, зображеної на рис. 3.1.

Згідно зі схемою заміщення зведений струм ротора відповідає виразу (3.1).
Обертовий момент двигуна M визначаємо з рівняння балансу втрат.

$$I_2' = \frac{U \phi}{\sqrt{(R_1 + R_2'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2}} \quad (3.1)$$

Електромагнітна потужність, яка передається від статора ротору, $P_1 = M \omega_0$.
Ця потужність складається з двох частин: основної, еквівалентної механічній потужності на валу ротора – $P = M \Omega$ і потужності втрат на нагрівання обмотки, яка дорівнює

$$P_1 - P = M \omega_0 - M \Omega = M(\omega_0 - \Omega) = M \omega_0 s$$

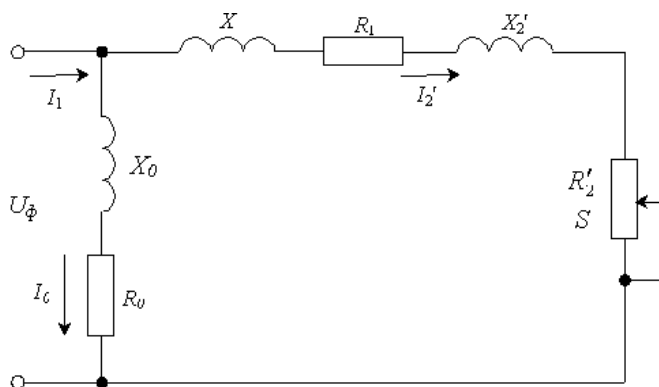


Рисунок 3.1 - Схема заміщення АД (одна фаза)

Водночас потужність втрат на нагрівання пропорційна квадрату струму ротора

$$M \omega_0 s = 3(I_2')^2 R_2' \quad (3.2)$$

Враховуючи (3.1), отримаємо

$$M = \frac{3U_{\phi}^2 R_2'}{\omega_0 \cdot s [(R_1 + R_2'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2]} \quad (3.3)$$

Це рівняння є рівнянням механічної характеристики АД. Воно показує від яких конструктивних і режимних параметрів залежить електромагнітний момент на валу двигуна і як він змінюється у залежності від ковзання та від напруги живлення.

Якщо побудувати графік функції $M = f(s)$, змінюючи s у межах від -1 до 0 і від 0 до 1 , то отримаємо криву, зображену на рис. 2. Крива має два екстремуми, в яких $M = M_{max}$, один у режимі двигуна, другий – у режимі генератора. Прирівнявши $dM/ds = 0$, можна знайти критичну точку на характеристиці, в якій $s = s_k$, $M = M_{max} = M_k$, а також знайти аналітичне вираження s_k і M_k .

$$s_k = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2}}, \quad (3.4)$$

$$M_k = \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_0 [R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2}]}, \quad (3.5)$$

де “+” – у режимі двигуна, “–” – у генераторному режимі.

Якщо (3.3) поділити на (3.5), то отримаємо

$$M = \frac{2M_k (1 + as_k)}{s/s_k + \frac{s_k}{s} + 2as_k}, \quad (3.6)$$

$$\text{де } a = \frac{R_1}{R_2'}.$$

Після відповідного перетворення (3.6) приймає вигляд

$$M = \frac{2M_{\kappa}(1+as_{\kappa})s}{s^2/s_{\kappa} + 2as_{\kappa} \cdot s + s_{\kappa}} \quad (3.7)$$

У такій формі це рівняння є *математичною моделлю АД*, зручною для побудови механічних характеристик у додатку EXCEL.

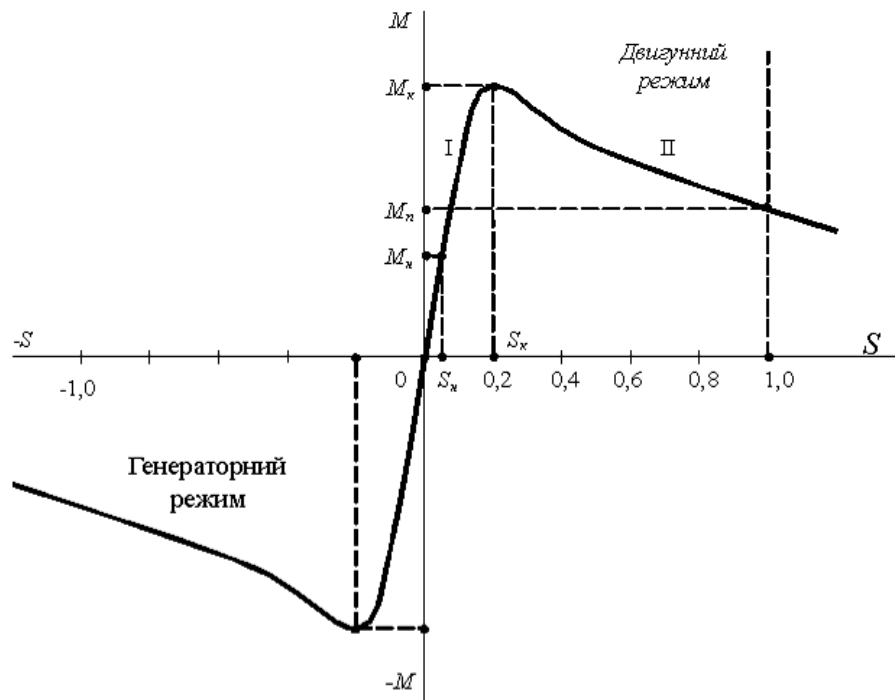


Рисунок 3.2 - Механічна характеристика АД

Дослідження характеристик АД при зміні напруги

Для дослідження обираємо двигун типу **4A71B2Y3** з додатку В, який має такі технічні дані:

P_n , кВт	η_n	$\cos\varphi$	I_l , А	s_n	x_{μ} , Ом	R_l , Ом	x_l , Ом	R_2' , Ом	x_2' , Ом	K_m	K_n	s_k	n_0 , об./хв.	p
1,1	77,5	0,87	2,5	0,063	249	11,6	4,81	6,41	7,48	2,2	2,0	0,39	3000	1

Розрахунки параметрів математичної моделі

$$a = R_1 / R_2' = 11,6 / 6,41 = 1,81;$$

$$as_k = 1,81 \cdot 0,39 = 0,706;$$

$$1 + as_k = 1 + 0,706 = 1,706;$$

$$\frac{1}{s_k} = \frac{1}{0,39} = 2,56;$$

$$2as_k = 2 \cdot 1,81 \cdot 0,39 = 1,41;$$

$$n_h = n_0 - s_h n_0 = 3000 - 0,063 \cdot 3000 = 2811 \text{ об./хв.},$$

$$M_H = 9,55 \frac{P_H}{n_H} = 9,55 \cdot 1100 / 2811 = 3,74 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_K = 2,2 M_H = 2,2 \cdot 3,74 = 8,22 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Обчислимо M_K для трьох значень напруг

$$1. U_{\phi 1} = 1 U_{\phi H}$$

$$2. U_{\phi 2} = 0,85 U_{\phi H}$$

$$2. U_{\phi 3} = 1,1 U_{\phi H}.$$

Відповідно до (3.5) складемо пропорції

1.	$M_K - U_{\phi H}^2$	2.	$M_K - U_{\phi H}^2$	3.	$M_K - U_{\phi H}^2$
	$M_{K1} - (1 \cdot U_{\phi 1})^2$		$M_{K2} - (0,85 U_{\phi 2})^2$		$M_{K3} - (1,1 U_{\phi 3})^2$

Отже

$$M_{K1} = 8,22 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{K2} = M_K \cdot (0,85)^2 = 8,22 \cdot (0,85)^2 = 5,94 \text{ Нм};$$

$$M_{K3} = M_K \cdot (1,1)^2 = 8,22 \cdot (1,1)^2 = 9,95 \text{ Нм}.$$

Створення таблиць та побудова графіків у додатку EXCEL

Записуємо формулу (3.7) для 3-х значень напруги

$$M1 = 2 \cdot 8,22 \cdot 1,706 \cdot s / (2,56s^2 + 1,41s + 0,39),$$

$$M2 = 2 \cdot 5,94 \cdot 1,706 \cdot s / (2,56s^2 + 1,41s + 0,39),$$

$$M3 = 2 \cdot 9,94 \cdot 1,706 \cdot s / (2,56s^2 + 1,41s + 0,39).$$

Вводимо в EXCEL у вигляді

$$\begin{aligned} &= 28 * (A1) / (2,56 * (A1) * (A1) + 1,41 * (A1) + 0,39); \\ &= 20,3 * (A1) / (2,56 * (A1) * (A1) + 1,41 * (A1) + 0,39); \\ &= 34 * (A1) / (2,56 * (A1) * (A1) + 1,41 * (A1) + 0,39). \end{aligned}$$

У комірки A1- A10 вводимо значення s від 0 до 1,0 з інтервалом 0,1, створюємо таблиці і графіки і імпортуємо їх у звіт.

Таблиця 3.1 – Результати розрахунків механічних характеристик АД при різних напругах живлення

Ковзання s	Момент при номінальній напрузі $M1$	Момент при напрузі 0,85 номінальної $M2$	Момент при напрузі 1,1 номінальної $M3$
0	0	0	0
0,1	5,030543	3,647143	6,108516
0,2	7,231405	5,242769	8,780992
0,3	8,050604	5,836688	9,775733
0,4	8,213552	5,954825	9,973599
0,5	8,069164	5,850144	9,798271
0,6	7,786429	5,645161	9,45495
0,7	7,448506	5,400167	9,044615
0,8	7,096692	5,145102	8,617412
0,9	6,751326	4,894711	8,198039
1	6,422018	4,655963	7,798165

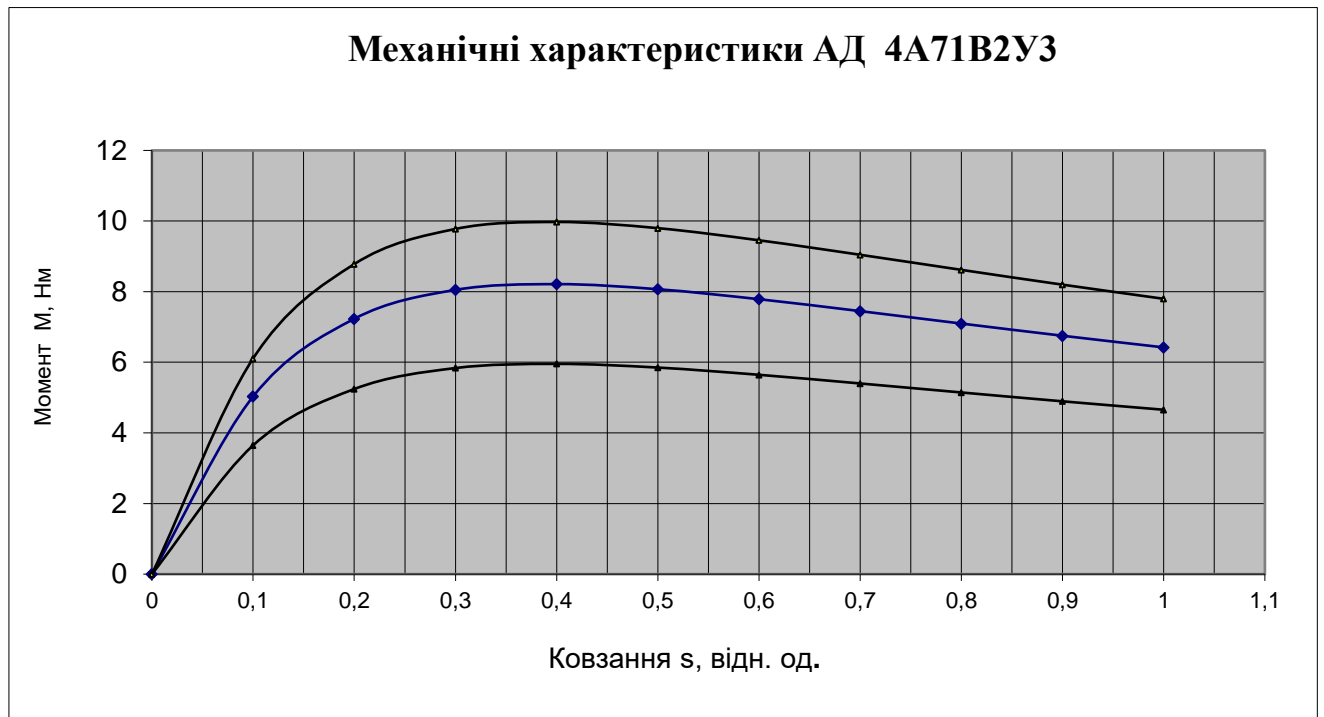


Рисунок 3.2 – Характеристики АД при зміні напруги живлення: середня крива – природна характеристика ($U_{\phi}=U_n$)

Висновки: Якщо двигун працює під номінальним навантаженням, яке дорівнює $M_{\text{ном}} \approx 4 \text{ Нм}$, то при номінальній напрузі живлення (середня крива) ковзання дорівнює номінальному - $s_n = 0,063$. Якщо ж напруга знизиться (нижня крива), то з тим самим навантаженням ковзання зросте майже вдвічі, до 0,12, швидкість двигуна зменшиться, втрати потужності зростуть пропорційно ковзанню.

Якщо ж напруга зросте, то ковзання зменшиться, швидкість збільшиться, втрати за рахунок ковзання зменшаться. Але зростуть втрати за рахунок зростання струму і перегріву двигуна. Отже, тривала робота двигуна при відхиленні напруги від номінальної призводить до зростання втрат. Регулювання напругою є енерговитратним і недоцільним.

Дослідження енергетичної ефективності АД

Енергетична ефективність електропривода визначається втратами потужності або значенням ККД. Математична модель для дослідження

енергоефективності АД має вигляд рівняння, яке розглядалося у лабораторній роботі №2

$$\eta(x) = \frac{\eta_{ном} (1+\alpha)x}{(1-\eta_{ном})x^2 + \eta_{ном} (1+\alpha)x + (1-\eta_{ном})\alpha} \quad (3.8)$$

Обчислимо коефіцієнт втрат

$$\begin{aligned} \alpha &= \Delta P_{пост} / \Delta P_{змном}, \\ \Delta P_H &= P_H(1-\eta_H) / \eta_H = 1100 \cdot (1-0,775) / 0,775 = 319,3 \text{ Вт}, \\ \omega_0 &= \frac{2\pi f}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{1} = 314, \\ I_2'^2 &= M_H \omega_0 s_H / 3R_2' = 3,74 \cdot 314 \cdot 0,063 / 3 \cdot 6,41 = 3,85, \\ I_2' &= \sqrt{I_2'^2} = \sqrt{3,85} = 1,96 \text{ А}, \\ \Delta P_{змном} &= 3I_2'^2(R_1 + R_2) = 3 \cdot 3,85(11,6 + 6,41) = 207,9 \text{ Вт}, \\ \Delta P_{пост} &= \Delta P_H - \Delta P_{змном} = 111,4 \text{ Вт}, \\ \alpha &= 111,4 / 207,9 = 0,54. \end{aligned}$$

Запишемо (3.8) у аналітичному вираженні

$$\eta(x) = \frac{0,775(1+0,54)x}{(1-0,775)x^2 + 0,775(1+0,54)x + (1-0,775)0,54} = 1,19x / (0,225x^2 + 1,19x + 0,122).$$

Запишемо у вигляді формули EXCEL:

$$= 1,19 * (A1) / (1,19 * (A1) + 0,225 * (A1) * (A1) + 0,122) \quad (3.9)$$

У комірки A1- A10 вводимо значення x від 0 до 2,0 з інтервалом 0,2, створюємо таблицю і діаграму та імпортуємо їх у звіт.

Таблиця 3.2 – Залежність ККД двигуна 4А71В2У3 від коефіцієнта навантаження

x	η
0	0
0,2	0,644986
0,4	0,750789
0,6	0,778626
0,8	0,781609
1	0,774236
1,2	0,762006
1,4	0,74742
1,6	0,731745
1,8	0,71567
2	0,699588



Рисунок 3.3 – Графік залежності ККД від коефіцієнта навантаження

Аналіз результатів і висновки: Робочий режим електропривода залежить від двох незалежних параметрів – моменту навантаження і напруги живлення. Якщо електропривід працює з номінальним навантаженням при номінальній напрузі, то робоча точка з координатами $s_n = 0,063$; $M_n = 3,74 \text{ Нм}$ знаходиться на природній характеристиці (середня крива на рис. 3). Цій точці відповідає мінімум втрат, або максимум ККД, який наближається до 0,80 на рис. 3.3. Якщо ж напруга знизиться (нижня крива на рис. 3), то при тому самому навантаженні ковзання зросте до 0,1, відповідно знизиться і ККД.

Таблиця В1 – Технічні дані асинхронних короткозамкнених двигунів серії 4А

№ за пор.	Типорозмір	P_n , кВт	η_n %	$\cos\varphi$	I_1 , А	s_n	x_μ , Ом	R_l , Ом	x_l , Ом	R_2 , Ом	x_2 , Ом	K_m	K_n	s_k	J кгм ²
1	4А71В2У3	1,1	77,5	0,87	2,5	0,063	249	11,6	4,81	6,41	7,48	2,2	2,0	0,39	0,0011
2	4А80А2У3	1,5	81,0	0,85	3,3	0,042	167	5,60	3,40	3,27	5,40	2,6	2,1	0,355	0,0018
3	4А80В2У3	2,2	83,0	0,87	4,6	0,043	129	3,62	2,38	2,34	4,15	2,6	2,1	0,380	0,0021
4	4А90L2У3	3,0	84,5	0,88	6,1	0,043	122	2,59	2,05	1,69	3,60	2,2	2,1	0,325	0,0035
5	4А100L2У3	4,0	86,5	0,89	7,9	0,033	95	1,51	1,54	1,01	2,77	2,5	2,0	0,280	0,0059
6	4А100L2У3	5,5	87,5	0,91	10,5	0,034	79,9	1,05	1,14	0,757	2,31	2,5	2,0	0,290	0,0075
7	4А112М2У3	7,5	87,5	0,88	14,8	0,025	55,2	0,686	0,865	0,417	2,09	2,8	2,0	0,170	0,0100
8	4А132М2У3	11,6	88	0,90	21,0	0,023	43,9	0,418	0,638	0,261	1,25	2,8	1,7	0,190	0,023
9	4А160S2У3	15,0	88	0,91	28,4	0,021	31,0	0,403	0,713	0,171	0,93	2,2	1,4	0,120	0,048
10	4А160М2У3	18,5	88,5	0,92	34,4	0,021	28,8	0,313	0,588	0,141	0,767	2,2	1,4	0,125	0,053
11	4А180S2У3	22,0	88,5	0,91	41,4	0,019	19,1	0,207	0,483	0,106	0,585	2,5	1,4	0,125	0,070
12	4А180М2У3	30,0	90,5	0,90	55,8	0,018	15,0	0,118	0,288	0,071	0,434	2,5	1,4	0,125	0,085
13	4А200М2У3	37,0	90	0,89	70,0	0,019	12,9	0,091	0,295	0,066	0,377	2,5	1,4	0,115	0,150
14*	4А200L2У3	45,0	91	0,90	83,3	0,018	12,95	0,071	0,233	0,053	0,344	2,5	1,4	0,115	0,170
15	4А80А4У3	1,1	75	0,81	2,74	0,054	136	9,62	6,25	5,45	9,62	2,2	2,0	0,340	0,0032
16	4А80В4У3	1,5	77	0,83	3,56	0,058	118	7,42	4,82	4,26	7,42	2,2	2,0	0,345	0,0033
17	4А90L4У3	2,2	80	0,83	5,0	0,051	92	4,29	3,33	2,63	5,70	2,4	2,1	0,330	0,0056
18	4А100S4У3	3,0	82	0,83	6,68	0,044	72,5	2,57	2,60	1,75	4,28	2,4	2,0	0,310	0,0087
19	4А100L4У3	4,0	84	0,84	8,60	0,046	61,5	1,72	2,02	1,36	3,59	2,4	2,0	0,315	0,011
20	4А112М4У3	5,5	85,5	0,85	11,5	0,036	53,7	1,23	1,50	0,787	2,49	2,2	2,0	0,250	0,017
21	4А132S4У3	7,5	87,5	0,86	15,1	0,029	43,7	0,699	1,24	0,481	1,89	3,0	2,2	0,195	0,028
22	4А132М4У3	11,0	87,5	0,87	21,9	0,028	32,1	0,432	0,854	0,321	1,31	3,0	2,2	0,195	0,040
23	4А160S4У3	15,0	88,5	0,88	29,2	0,023	30,2	0,354	0,648	0,188	0,98	2,3	1,4	0,160	0,10
24	4А160М4У3	18,5	89,5	0,88	35,6	0,022	26,6	0,260	0,525	0,148	0,803	2,3	1,4	0,160	0,13
25	4А80А4У3	1,1	75	0,81	2,74	0,054	136	9,62	6,25	5,45	9,62	2,2	2,0	0,340	0,0032

*З 1-го по 14-й – синхронна частота $n_0 = 3000$ об/хв.; з 15-го по 25 – й синхронна частота $n_0 = 1500$ об/хв.; фазна напруга у всіх – 220 В; 4А – серія АД; 71 – 200 – висота осі обертання; А – станина і щити з алюмінію; S, L, М – розмір за довжиною; 2; 4; 6; 8; 10; 12 – число полюсів; У3 – кліматичні умови експлуатації.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

Дослідження на математичній моделі механічних характеристик трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором при частотному регулюванні

Мета лабораторної роботи – ознайомлення з методом частотного регулювання і його перевагами.

Завдання лабораторної роботи

- теоретичне обґрунтування методу,
- дослідження механічних характеристик АД при частотному регулюванні,
- обробка результатів дослідів та складання звіту.

Основні теоретичні відомості

Для застосування у регульованому електроприводі асинхронних двигунів з КЗ-ротором необхідно, щоб регульовальні характеристики в широкому діапазоні регулювання наближалися до абсолютно жорстких, а двигун при регулюванні частоти зберігав перевантажувальну здатність, тобто щоб момент на валу двигуна при регулюванні частоти не змінювався. Цю умову математично можна записати виразом

$$\lambda = M_{\kappa} / M_{\text{ном}} = \text{const} \quad (4.1)$$

Сенс частотного регулювання АД-КЗ можна пояснити, розглядаючи його в математичному і фізичному аспектах. Аналізуючи вирази

$$M_{\kappa} = \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_0[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2}]}, \quad (4.2)$$

i

$$M = \frac{2M_{\kappa}(1 + as_{\kappa})}{s/s_{\kappa} + \frac{s_{\kappa}}{s} + 2as_{\kappa}} \quad (4.3)$$

з лабораторної роботи №3 бачимо, що M залежить від M_{κ} , а $M_{\kappa} \equiv (U/f)^2$.

У (4.3) треба врахувати, що

$$x_1 + x_2' \equiv \omega_0 \equiv 2\pi f.$$

Отже, наближено можна вважати, що знаменник пропорційний частоті струму в квадраті. Якщо одночасно змінювати U і f так, щоб дотримуватись умови

$$U/f = \text{const},$$

то за виразом (4.3) отримаємо

$$M_{\kappa} = \text{const}. \quad (4.4)$$

У фізичному аспекті – напруга, частота і магнітний потік статора пов'язані між собою залежністю

$$U_{\phi} \approx E_{\phi} = 4,44N_1\Phi_m \cdot f \quad (4.5)$$

де N_1 – число витків обмотки статора.

Якщо регулювати частоту струму f при $U_\phi = const$, то при зменшенні частоти повинен зростати потік Φ_m . Це призведе до насичення магнітної системи, зростання втрат на гістерезис і вихрові струми.

При регулюванні частоти у бік її зростання магнітний потік буде зменшуватись, а це призведе до зменшення моменту на валу, тобто до втрати навантажувальної здатності. Отже, якщо записати (5) у відносних одиницях, то отримаємо

$$\Phi_* = U_* / f_* = const \quad (4.6)$$

де підрядковий індекс * означає, що $\Phi_* = \Phi / \Phi_H$; $U_* = U / U_H$; $f_* = f / f_H$.

Отже, сенс частотного регулювання полягає у тому, що при зміні частоти струму необхідно змінювати напругу підтримуючи стабільним значення вектора потоку. Таке регулювання ще називають векторним.

Дослідження механічних характеристик АД при частотному регулюванні

Для дослідження обираємо двигун (з лаб. роб. №3) типу **4A71B2Y3** з додатку А, який має такі технічні дані:

P_n , кВт	η_n	$\cos\varphi$	I_L , А	s_n	x_μ , Ом	R_L , Ом	x_L , Ом	R_2' , Ом	x_2' , Ом	K_m	K_n	s_k	n_0 , об./хв.	p
1,1	77,5	0,87	2,5	0,063	249	11,6	4,81	6,41	7,48	2,2	2,0	0,39	3000	1

За математичною моделлю

$$M = \frac{2M_K(1+as_K)s}{s^2/s_K + 2as_K \cdot s + s_K}, \quad (4.7)$$

побудуємо регулювальні характеристики досліджуваного АД за різних значень напруги і частоти струму живлення.

За вихідну модель візьмемо математичну модель природної характеристики (з лабораторної роботи №3), тобто рівняння

$$= 28 * (A1) / (2,56(A1) * (A1) + 1,41 * (A1) + 0,39), \quad (4.8)$$

Це рівняння отримане при попередніх дослідженнях з номінальною напругою $U_{\phi} = 220B$ і частотою струму $f_n = 50Гц$. Відношення

$$U / f = 220 / 50 = 4,4, \quad (4.9)$$

Будемо змінювати f і U .

Для першої регулювальної характеристики встановимо

$$f_1 = 0,75 \cdot f_n = 37,5 \text{ Гц}.$$

Відповідне значення напруги

$$U_{\phi 1} = 4,4 \cdot f_1 = 165B;$$

$$U_{\phi 1} / f_1 = 4,4.$$

При побудові регулювальних характеристик у спільних осях координат ми повинні враховувати, що зміна синхронної частоти на деяку величину еквівалентна зміні ковзання і переносить точку відліку (нуль) на шкалі ковзання по відношенні до вихідної характеристики на таку ж величину.

Якщо ми змінили синхронну частоту з 50 Гц до $37,5 \text{ Гц}$, тобто зменшили на $0,25 f_n$, то перша точка цієї характеристики на шкалі ковзання повинна знаходитись у **точці 0,25** (табл. 4.1).

Другу регулювальну характеристику будуємо при синхронній частоті

$$f_2 = 0,5 \cdot f_n = 25 \text{Гц}.$$

Відповідне значення напруги

$$U_{\phi 2} = 4,4 \cdot f_2 = 110 \text{В};$$

$$U_{\phi 2} / f_2 = 4,4.$$

Характеристика на шкалі ковзання починається у **точці 0,5** (табл. 4.1).

Третю регулювальну характеристику будуємо при синхронній частоті

$$f_3 = 0,25 \cdot f_n = 12,5 \text{Гц}$$

Відповідне значення напруги

$$U_{\phi 3} = 4,4 \cdot f_3 = 55 \text{В};$$

$$U_{\phi 3} / f_3 = 4,4.$$

Характеристика на шкалі ковзання починається у **точці 0,75** (табл. 4.1).

Далі відкриваємо аркуш EXCEL, створюємо таблиці і графіки і імпортуємо їх у звіт.

Таблиця 4.1 - Залежність моменту від ковзання $M = f(s)$

$f_u = 50 \Gamma u$		$f_1 = 37,5 \Gamma u$		$f_2 = 25 \Gamma u$		$f_3 = 12,5 \Gamma u$	
s	M	s	$M1$	s	$M2$	s	$M3$
0	0						
0,05	2,998501						
0,1	5,030543						
0,15	6,372326						
0,2	7,231405						
0,25	7,756233	0	0				
0,3	8,050604	0,05	2,998501				
0,35	8,186451	0,1	5,030543				
0,4	8,213552	0,15	6,372326				
0,45	8,16644	0,2	7,231405				
0,5	8,069164	0,25	7,756233	0	0		
0,55	7,938554	0,3	8,050604	0,05	2,998501		
0,6	7,786429	0,35	8,186451	0,1	5,030543		
0,65	7,621121	0,4	8,213552	0,15	6,372326		
0,7	7,448506	0,45	8,16644	0,2	7,231405		
0,75	7,272727	0,5	8,069164	0,25	7,756233	0	0
0,8	7,096692	0,55	7,938554	0,3	8,050604	0,05	2,998501
0,85	6,922428	0,6	7,786429	0,35	8,186451	0,1	5,030543
0,9	6,751326	0,65	7,621121	0,4	8,213552	0,15	6,372326
0,95	6,584321	0,7	7,448506	0,45	8,16644	0,2	7,231405
1	6,422018	0,75	7,272727	0,5	8,069164	0,25	7,756233
		0,8	7,096692	0,55	7,938554	0,3	8,050604
		0,85	6,922428	0,6	7,786429	0,35	8,186451
		0,9	6,751326	0,65	7,621121	0,4	8,213552
		0,95	6,584321	0,7	7,448506	0,45	8,16644
		1	6,422018	0,75	7,272727	0,5	8,069164
				0,8	7,096692	0,55	7,938554
				0,85	6,922428	0,6	7,786429
				0,9	6,751326	0,65	7,621121
				0,95	6,584321	0,7	7,448506
				1	6,422018	0,75	7,272727
						0,8	7,096692
						0,85	6,922428
						0,9	6,751326
						0,95	6,584321
						1	6,422018

Механічні характеристики АД 4А71В2УЗ при частотному регулюванні

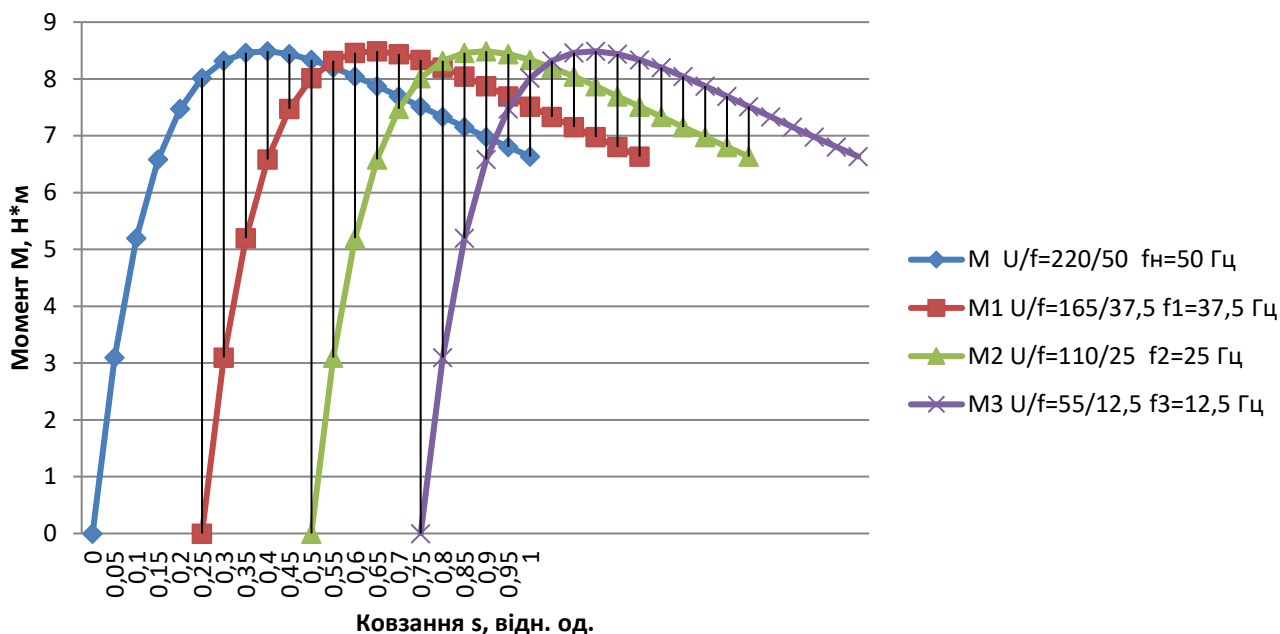


Рисунок 4.1 - Природна і регульовальні характеристики АД-КЗ при частотному регулюванні: шкала ковзання пропорційна шкалі синхронних частот – $0s \equiv n_0 = 3000$ об/хв.; $0,25 \equiv 2250$ об/хв.; $0,5 \equiv 1500$ об/хв.; $0,75 \equiv 750$ об/хв.;

Висновки: Умови (4.1) і (4.4) витримуються, двигун зберігає незмінним критичний момент у всьому діапазоні регулювання. При номінальному навантаженні $M_{ном} = 3,74 \approx 4H_m$ на будь-якій синхронній частоті в діапазоні регулювання двигун буде працювати з номінальним ковзанням $s_n \approx 0,06$, тобто з мінімальними втратами. Якщо повернути осі графічного зображення характеристик за ходом годинникової стрілки на 90° і обмежити графіки лінійною частиною, то отримані характеристики подібні до регульовальних характеристик за напругою двигуна постійного струму.

Отже, при живленні АД-КЗ від тиристорного перетворювача частоти з ланкою постійного струму він стає регульованим у широкому діапазоні з мінімальними втратами.

Таблиця Г1 – Технічні дані асинхронних короткозамкнених двигунів серії 4А

№ за пор.	Типорозмір	P_n , кВт	η_n , %	$\cos\varphi$	I_l , А	s_n	x_μ , Ом	R_l , Ом	x_l , Ом	R_2' , Ом	x_2' , Ом	K_m	K_n	s_k	J , кгм ²
1	4А71В2У3	1,1	77,5	0,87	2,5	0,063	249	11,6	4,81	6,41	7,48	2,2	2,0	0,39	0,0011
2	4А80А2У3	1,5	81,0	0,85	3,3	0,042	167	5,60	3,40	3,27	5,40	2,6	2,1	0,355	0,0018
3	4А80В2У3	2,2	83,0	0,87	4,6	0,043	129	3,62	2,38	2,34	4,15	2,6	2,1	0,380	0,0021
4	4А90L2У3	3,0	84,5	0,88	6,1	0,043	122	2,59	2,05	1,69	3,60	2,2	2,1	0,325	0,0035
5	4А100L2У3	4,0	86,5	0,89	7,9	0,033	95	1,51	1,54	1,01	2,77	2,5	2,0	0,280	0,0059
6	4А100L2У3	5,5	87,5	0,91	10,5	0,034	79,9	1,05	1,14	0,757	2,31	2,5	2,0	0,290	0,0075
7	4А112М2У3	7,5	87,5	0,88	14,8	0,025	55,2	0,686	0,865	0,417	2,09	2,8	2,0	0,170	0,0100
8	4А132М2У3	11,6	88	0,90	21,0	0,023	43,9	0,418	0,638	0,261	1,25	2,8	1,7	0,190	0,023
9	4А160S2У3	15,0	88	0,91	28,4	0,021	31,0	0,403	0,713	0,171	0,93	2,2	1,4	0,120	0,048
10	4А160М2У3	18,5	88,5	0,92	34,4	0,021	28,8	0,313	0,588	0,141	0,767	2,2	1,4	0,125	0,053
11	4А180S2У3	22,0	88,5	0,91	41,4	0,019	19,1	0,207	0,483	0,106	0,585	2,5	1,4	0,125	0,070
12	4А180М2У3	30,0	90,5	0,90	55,8	0,018	15,0	0,118	0,288	0,071	0,434	2,5	1,4	0,125	0,085
13	4А200М2У3	37,0	90	0,89	70,0	0,019	12,9	0,091	0,295	0,066	0,377	2,5	1,4	0,115	0,150
14*	4А200L2У3	45,0	91	0,90	83,3	0,018	12,95	0,071	0,233	0,053	0,344	2,5	1,4	0,115	0,170
15	4А80А4У3	1,1	75	0,81	2,74	0,054	136	9,62	6,25	5,45	9,62	2,2	2,0	0,340	0,0032
16	4А80В4У3	1,5	77	0,83	3,56	0,058	118	7,42	4,82	4,26	7,42	2,2	2,0	0,345	0,0033
17	4А90L4У3	2,2	80	0,83	5,0	0,051	92	4,29	3,33	2,63	5,70	2,4	2,1	0,330	0,0056
18	4А100S4У3	3,0	82	0,83	6,68	0,044	72,5	2,57	2,60	1,75	4,28	2,4	2,0	0,310	0,0087
19	4А100L4У3	4,0	84	0,84	8,60	0,046	61,5	1,72	2,02	1,36	3,59	2,4	2,0	0,315	0,011
20	4А112М4У3	5,5	85,5	0,85	11,5	0,036	53,7	1,23	1,50	0,787	2,49	2,2	2,0	0,250	0,017
21	4А132S4У3	7,5	87,5	0,86	15,1	0,029	43,7	0,699	1,24	0,481	1,89	3,0	2,2	0,195	0,028
22	4А132М4У3	11,0	87,5	0,87	21,9	0,028	32,1	0,432	0,854	0,321	1,31	3,0	2,2	0,195	0,040
23	4А160S4У3	15,0	88,5	0,88	29,2	0,023	30,2	0,354	0,648	0,188	0,98	2,3	1,4	0,160	0,10
24	4А160М4У3	18,5	89,5	0,88	35,6	0,022	26,6	0,260	0,525	0,148	0,803	2,3	1,4	0,160	0,13
25	4А80А4У3	1,1	75	0,81	2,74	0,054	136	9,62	6,25	5,45	9,62	2,2	2,0	0,340	0,0032

*З 1-го по 14-й – синхронна частота $n_0 = 3000$ об/хв.; з 15-го по 25 – й синхронна частота $n_0 = 1500$ об/хв.; фазна напруга у всіх – 220 В; 4А – серія АД; 71 – 200 – висота осі обертання; А – станина і щити з алюмінію; S, L, М – розмір за довжиною; 2; 4; 6; 8; 10; 12 – число полюсів; У3 – кліматичні умови експлуатації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. М.Г. Чиликин: Общий курс электропривода. Изд. Четвертое, перераб. и доп. - *М.: Энергия; 1965.*
2. В.Я. Решетник: Основы автоматизованого электропривода. Навч. посібник : Видавництво ТНТУ; Тернопіль, 2009
3. Н.Ф. Ильинский, Ю. В. Рожанковский, А. О. Горнов Энергосбережение в электроприводе. Высшая школа, М.:. 1989
4. Вильям Орвис: EXCEL для ученых, инженеров и студентов: Пер. с англ. – К. Юниор, 1999.

